На правах рукописи

УДК 621.791:621.643.411

ШИПИЛОВ Александр Валентинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ ТРУБОПРОВОДОВ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2013 г.

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: **ПОЛОСКОВ Сергей Иосифович,** доктор технических наук

Официальные оппоненты: **СТЕКЛОВ Олег Иванович,** доктор технических наук, профессор, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

БРОДЯГИН Владимир Николаевич, кандидат технических наук, ГУП «МОСГАЗ», главный сварщик

Ведущая организация: Научно-исследовательский и проектный институт по строительству и эксплуатации объектов топливно-энергетического комплекса **(НИПИСтройТЭК)**, г. Москва

Защита диссертации состоится «25» апреля 2013 г. в _____часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим присылать по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Бау

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан « ____ » _____2013 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2029728
Исследование
Шипилов А.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент А.В. Коновалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Компрессорным станциям (КС), как важной составной части инфраструктуры магистральных газопроводов уделяется исключительное внимание. Эффективность работы КС обеспечивают не только технологические трубопроводы большого диаметра (до 1420 мм), предназначенные для транспортировки газа, но и обеспечивающие эту операцию многочисленные трубопроводы малых диаметров (от 12 до 219 мм) и толщиной стенки от 2 до 15 мм. Основной материал труб - низкоуглеродистые низколегированные стали, из которых изготавливают до 85 % трубопроводов.

Проведенный анализ причин возникновения брака по сварке показал, что обеспечение стабильно высокого качества сварных соединений во многом определяются субъективным влиянием сварщика: его квалификацией, мотивацией, психофизическим состоянием. Вопросы автоматизации сварки трубопроводов большого диаметра плавящимся электродом успешно решены, однако сварка технологических трубопроводов малых диаметров до настоящего времени выполняется с широким использованием ручной дуговой сваркой. При этом наряду с браком по сварке, высока вероятность попадания брызг металла, шлака и частиц окалины во внутренние полости трубопроводов, что приводит к авариям, либо снижению срока службы технологического оборудования. Из-за перечисленных причин брак по сварке доходит до 8-10%.

Замена ручной сварки на автоматическую плавящимся электродом затруднена из-за высокой плотности трубопроводов и значительных размеров автоматов. В этой связи для трубопроводов малых диаметров перспективна автоматическая орбитальная сварка неплавящимся электродом в инертных газах. Однако высокое разбрызгивание и нестабильность формирования швов при сварке трубопроводов из углеродистых, низкоуглеродистых низколегированных сталей остается главным препятствием использования сварки неплавящимся электродом. Поэтому разработка технологий и оборудования для автоматической орбитальной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом, промышленное применение которых исключает вероятность возникновения подобных явлений является актуальной задачей.

Цель работы - обеспечение стабильно высокого качества сварных соединений трубопроводов малых диаметров из низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей на компрессорных станциях.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Выполнить анализ методов обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений при строительстве и ремонте трубопроводов КС.

2. Выполнить теоретический анализ процессов в сварочной ванне при сварке низкоуглеродистых низколегированных сталей и разработать методы исключения их «кипения» при сварке неплавящимся электродом.

3. Разработать нестационарную физико-математическая модель формирования шва при орбитальной сварке неплавящимся электродом с присадочной проволокой, основанную на системе дифференциальных

Библиотека

уравнений теплопроводности и равновесия поверхности расплава, граничные условия которых учитывают разделку кромок стыка и пространственное положение сварочной ванны.

4. Выполнить компьютерный инженерный анализ влияния параметров сварки на показатели формирования шва и определить их оптимальные соотношения для обоснования технических требований к сварочным технологиям и оборудованию, обеспечивающим стабильно высокое качество сварных соединений.

5. Разработать и внедрить технологии автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом трубопроводов малых диаметров из углеродистых, низкоуглеродистых низколегированных сталей и оборудование для их реализации при выполнении сварочных работ на КС.

Методы исследований. Теоретический анализ металлургических процессов при сварке низкоуглеродистых низколегированных сталей выполнен на основе количественного анализа влияния концентрации примесей на свойства расплава. При анализе условий формирования швов и оптимизации режимов сварки использовались методы компьютерного моделирования. Достоверность результатов моделирования проверялась по опытным данным с использованием статистических критериев. Качество соединений оценивали на основании металлографических исследований.

Научная новизна

1. Установлено, что «кипение» и нестабильное формирование швов при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом трубопроводов из низкоуглеродистых низколегированных сталей обусловлено недостаточной раскисленностью основного металла, которая устраняется подачей присадочной проволоки, содержащей раскисляющие элементы, в количестве не менее 30% объема сварочной ванны.

2. Определено, что качественное формирование корня шва достигается при шаго-импульсной сварке, при которой шаг перемещения, амплитуда и длительность импульса тока обеспечивают периодическое плавление и полную кристаллизацию проплава корня шва, а на заполняющих проходах - колебаниями электрода в разделке по трапецеидальной траектории с периодом колебаний, обратно пропорциональным скорости сварки с коэффициентом пропорциональности не более 7…8, и задержками дуги у кромок на 0,25…0,30 с, при размахе колебаний до 0,70…0,75 ширины разделки.

3. Показано, что изменение геометрических размеров сварных швов из-за изменения пространственного положения сварочной ванны устраняется программированием тепловложения по синусоидальному закону, с увеличением его на 9…11% от номинального значения в положении 2,5…3,0 ч и уменьшением на 5…6% в положении 8,5…9,0 ч, при условии начала процесса сварки в положении 7,0-8,0 ч по циферблату часов.

Практическая значимость работы. На основе полученных результатов разработаны технологии и оборудование автоматической орбитальной сварки трубопроводов малых диаметров их низкоуглеродистых низколегированных сталей, внедренные при строительстве и ремонте КС.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на I Международной научно-практической конференции «Качество как условие повышения конкурентоспособности и путь к устойчивому развитию» (Улан-Удэ, 2009); V Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2010); I Международной научной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологий» (Липецк, 2010); X Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (СПб., 2010); I Всероссийской научно-технической конференции «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве» (Орск, 2011); IV Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2011)» (Москва, 2011); семинаре кафедры «Сварочные технологии и диагностика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2012).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и 3 приложений. Диссертация написана на 185 стр., и содержит 93 рисунка, 24 таблицы. Список литературы состоит из 123 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность работы, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 показано, что к моменту постановки цели работы фундаментальные исследования по повышению качества сварных соединений осуществлены Н.П. Алешиным, Б.Е. Патоном, Л.М. Лобановым и др. Значимый вклад в исследование особенностей процессов сварки трубопроводов и разработку необходимого оборудования внесен такими учеными, как А.И. Акулов, Г.Г. Чернышов, Ю.С. Ищенко, В.А. Букаров, В.И. Гриненко, В.В. Рощин, В.А. Хаванов, Б.Л. Гецкин, А.К. Гранкин, E. Stava, D. Yapp, M.D. Ngo и др. Автоматизацией самих сварочных процессов занимались Э.А. Гладков, А.Е. Коротынский, Н.М. Махлин, N. Murugan, T. Era, D. B. Zhao, H. Watanabe, K. Hori и др. Накоплен опыт по разработке методик анализа и моделей процессов сварки плавлением (В.А. Судник, Э.Л. Макаров, В.А. Ерофеев, В.И. Махненко, А.В. Коновалов, А.С. Куркин, F. Miyasaka, T. Ohji , S.-J. Na и др.).

Однако в последние годы большое значение стали приобретать вопросы обеспечения надежности функционирования оборудования КС и герметичности технологических трубопроводов малых диаметров, которым по целому ряду причин ранее не уделялось достаточного внимания. Обзор теоретических и экспериментальных исследований показал, что нестабильное формирование шва при орбитальной сварке технологических трубопроводов КС могут иметь различные причины, в том числе нестабильное распределение значений теплофизических характеристик вдоль стыка, значения которых для

жидкого состояния сложно оценить, и «кипение» (рис. 1) сварочной ванны при сварке неплавящимся электродом низкоуглеродистых низколегированных сталей. Поэтому первоочередной задачей должен стать анализ процессов в сварочной ванне и разработка методов предотвращения ее кипения.

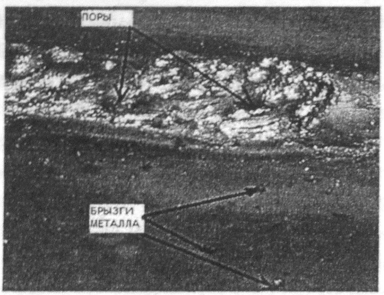

Рис. 1. Внешний вид сварного шва из Ст. 3, выполненного аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом: 1, 2 – поры и брызги соответственно

Одновременно было определено, что только оценка чувствительности формирования шва к нестабильности параметров процесса сварки позволит достоверно установить причины их возникновения и разработать приёмы их компенсации, определить требования к качеству сборки и к точности оборудования. Задача определения чувствительности швов к отклонениям может быть эффективно решена методами компьютерного моделирования. Причем разработанные для этого модели должны учитывать свойства стали и параметры процесса, а также форму разделки и погрешности сборки стыков.

В главе 2 выполнен анализ причин нестабильности формирования швов при сварке низкоуглеродистых низколегированных сталей. Анализ металлургических процессов показал, что причиной кипения не полностью раскисленных сталей является выделение углекислого и угарного газа, обусловленное нестабильным и повышенным содержанием кислорода в сталях, полученных открытой выплавкой. Такой способ производства стали является наиболее простым методом ее получения, однако приводит к незавершенности металлургических процессов при выплавке. Решение проблемы «кипения» при сварке низкоуглеродистых низколегированных сталей путем реализации «традиционных» способов воздействия на металлургические процессы в ванне жидкого металла, посредством активной газовой среды на основе CO_2 или через флюс, что применительно к автоматической орбитальной сварки труб малого диаметра затруднено. Поэтому наиболее оптимальный путь воздействия - это раскисление ванны посредством вводимого в нее присадочного металла. Расчеты показали, что предотвратить негативное влияние нестабильного содержания кислорода, содержащегося от 0,01 до 0,02 % в низкоуглеродистых сталях можно подачей относительно небольшого количества присадочного металла, содержащего такие активные раскислители (рис. 2) как кремний и марганец. Присадочный металл, в виде проволоки необходимо подавать в головную часть сварочной ванны под дугу таким образом, чтобы он при плавлении экранировал основной металл от непосредственного воздействия дуги. Расчет необходимого количества присадочной проволоки для

раскисления ванны показал, что ее количество в расплавленном металле, для полного исключения кипения ванны, должно быть не менее 30 % от ее объема.

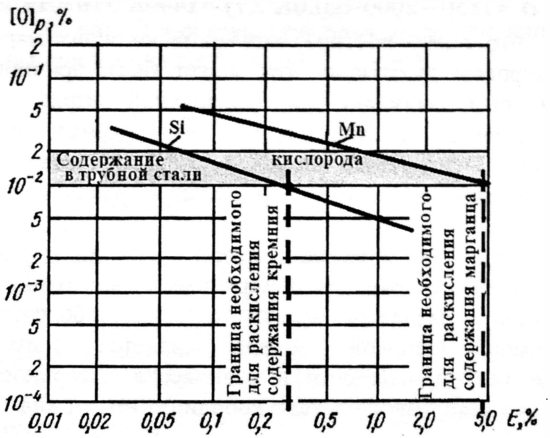

Рис. 2. Граничные концентрации кремния и марганца при сварке трубных сталей

Определено, что для лучшего перемешивания и более полного раскисления расплавленного металла целесообразно использовать импульсные технологии сварки с динамическим воздействием дуги на сварочную ванну. При заполнении разделки рекомендовано использовать колебания электрода.

Известно, что на качество формирования швов существенно влияет поверхностное натяжение расплава. Для оценки влияния содержания кислорода на поверхностное натяжение расплава использовали методику С.И. Попеля, который предложил оценивать силы поверхностного натяжения как:

$$\sigma = \sigma_{Fe} - 2000 \cdot \lg \Sigma F_i \cdot x_i$$

При проведении расчетов был взят химический состав стали Ст 3кп, так как данная сталь широко применяется в трубопроводах КС.

Результаты расчетов приведены в табл.1.

Таблица 1.

Расчет поверхностного натяжения стали марки Ст 3кп

Расчетный параметр	Элемент					
	C	*Mn*	*Si*	*S*	*O*	*Fe*
весовое содержание компонента d_i	0,18	0,52	0,1	0,05	0,003-0,06	99,0
атомный вес компонента A_i	12	28	55	32	16	56
молярная доля компонента $n_i = d_i / A_i$	0,015	0,0095	0,007	0,0016	0,00018-0,0038	1,736
сумма молярных долей $\sum n_i$	1,846					
атомная доля компонента x_i	0,0081	0,0051	0,004	0,0009	0,0001-0.00203	0,949
капиллярная активность F_i $x_i \cdot F_{i(1873)}$	0,0162	0,0475	0,0088	0,43	0,1-2,03	0,949
капиллярная активность расплава $\sum x_i \cdot F_{i(1873)}$	1,6-3,7					

Установлено, что в зависимости от содержания кислорода в стали Ст 3 кп поверхностное натяжение σ при температуре 1600 °С может изменяться более чем в два раза и составлять $\sigma = 1850 - 2000 \cdot \lg(1{,}6K\ 3{,}7) = 1440K\ 710$ мДж/м^2. Проведенный расчёт показал, что поверхностное натяжение кипящих марок стали колеблется в очень широком диапазоне, что может быть причиной нестабильности формирования шва, особенно при орбитальной сварке, при которой поверхностное натяжение является одной из главных сил, участвующих в формировании сварочной ванны. Поэтому подобная нестабильность должна учитываться при сварке низкоуглеродистых низколегированных сталей.

В главе 3 разработана теоретическая модель нестационарной орбитальной импульсной дуговой сварки с поперечными колебаниями неплавящегося электрода стыков с разделкой кромок, с учетом сборочных зазоров и смещений кромок. Основой модели является система дифференциальных уравнений теплопроводности и равновесия поверхности *z(x,y)* сварочной ванны, которые в декартовой системе координат имеют вид

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right),$$

$$\sigma\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right) + \frac{2k_I I_a^2}{\pi R^2}\exp\left(-2\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{R^2}\right) + \rho g(z_{\max} - z(x,y)) + p_i = 0$$

где H – объемная энтальпия; T - температура λ – коэффициент теплопроводности, σ - поверхностное натяжение, k_i - электродинамическая постоянная; I, R – ток и радиус дуги, ρ – плотность расплавленного металла; g – ускорение свободного падения; z_{max} - максимальная высота поверхности ванны, p_i - внутреннее давление, определяемое из условия сохранения баланса масс при подаче присадочной проволоки и заполнении разделки кромок.

Особенностью модели является учёт в ней нестационарных эффектов формирования шва при сварке периодическими импульсами тока дуги и поперечными колебаниями горелки, которые вызывают сильное изменение формы сварочной ванны и шва. В уравнениях и их граничных условиях учтено изменение мощности и траектории перемещения дуги, что изменяет распределение теплового потока:

$$q(x,y) = \frac{2P(t)}{\pi R^2}\exp\left(-2\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{R^2}\right)$$

где $P(t)$ – мощность теплового потока, периодически изменяющаяся во времени t; x_0, y_0 - координаты центра источника, изменяющиеся во времени t, $x_0 = v_w t$, v_w – скорость сварки.

Система уравнений модели решалась численно методом конечных разностей, что позволило виртуально воспроизвести формирование сварочной ванны и шва в различных пространственных положениях орбитальной сварки вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки. Модель позволяет воспроизводить влияние нестабильных значений множества

технологических факторов сварки на формирование сварочной ванны и профиль поперечного сечения шва при перемещении сварочной горелки по орбитальному стыку.

На рис. 3 показан результат моделирования формирования сварочной ванны при импульсной сварке.

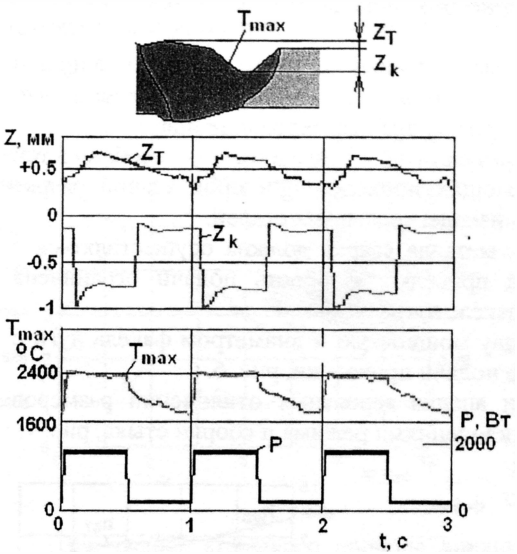

Рис. 3. Изменение мощности дуги P, глубины кратера Z_k, выпуклости расплава Z_T и максимальной температуры T_{max} сварочной ванны при импульсной сварке

На рис. 4 показан результат моделирования формирования облицовочного слоя при сварке с колебаниями сварочной горелки.

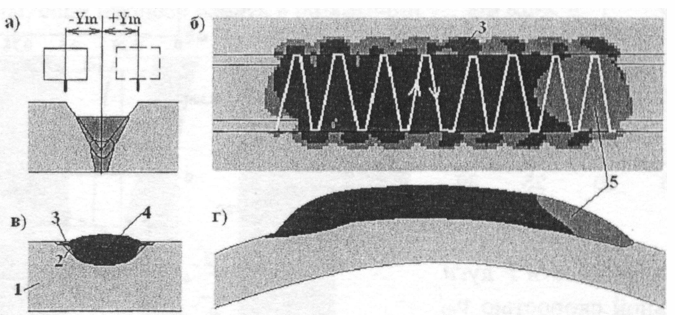

Рис. 4. Формирование облицовочного слоя при сварке с поперечными колебаниями горелки: *а* - разделка кромок; *б* - вид на стык сверху на начальной стадии сварки; *в, г* - поперечное и продольное сечение шва по плоскости симметрии стыка (*1* - исходный металл; *2* - зона периодического оплавления, *3* - зона поступления основного металла в сварочную ванну *4*)

Достоверность воспроизведения влияния различных факторов на

формирование шва была проверена путём выполнения тестовых сварок и сопоставления их с результатами моделирования, рис.5.

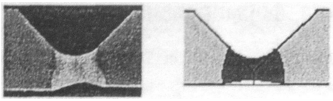

Рис. 5. Сравнение результатов тестовой сварки и моделирования формирования корневого прохода

Анализ результатов проверки, выполненный с учётом точности данных о теплофизических свойствах стали и точности измерения, показал, что разработанная модель адекватно воспроизводит формирование шва.

В главе 4 изложены результаты исследования особенностей формирования корневых и заполняющих проходов при орбитальной сварке стыков труб из низкоуглеродистых низколегированных сталей.

Для обеспечения раскисления металла сварка должна осуществляться с подачей значительного количества присадки. Скорость подачи ограничена условиями плавления проволоки в факеле дуги.

Установлена зависимость между мощностью и диаметром факела дуги с максимально допустимой скоростью подачи проволоки, рис. 6.

Одновременно был выполнен анализ вероятных отклонений размеров шва, обусловленных случайными отклонениями режима и сборки стыка, рис. 7.

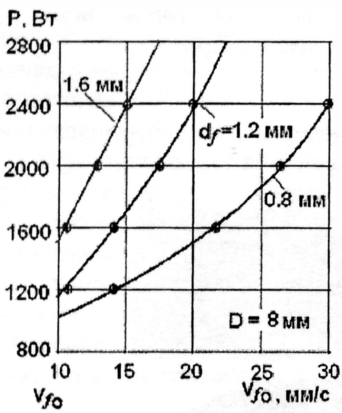

Рис. 6. Связь мощности P дуги и максимальной скоростью v_{f0} подачи присадочной проволоки разных d_f диаметров

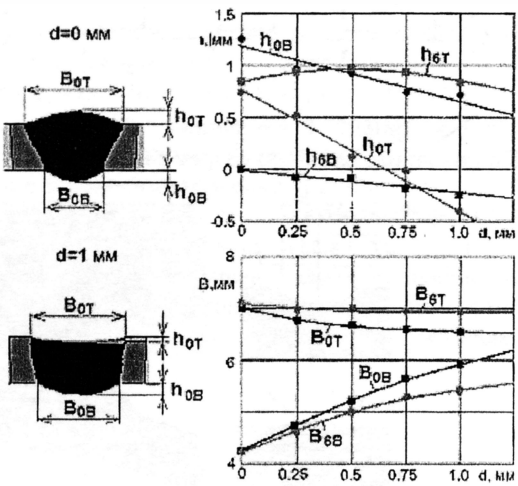

Рис. 7. Зависимость размеров шва *B* от ширины сборочного зазора d

Выполненные расчеты показывают, что возможная вогнутость корня должна быть в пределах 0,8 - 1,5 мм, а проплав корня шва в зависимости от диаметра свариваемых труб не должен превышать 1,5-2,5 мм. Для уменьшения концентрации напряжений в наружных слоях шва его высота при выполнении облицовочных проходов не должна превышать 0,5-1,5 мм. Приведенные

данные показывают, что эти условия обеспечиваются только при ширине зазора, не превышающего b < 0,85 мм. Такие жесткие требования к геометрическим размерам швов не позволяют реализовывать процесс сварки без изменения режима в зависимости от пространственного положения сварочной ванны, поэтому при определении режима сварки корневых проходов импульсной дугой учитывалась необходимость программного изменения параметров импульса при перемещении горелки по стыку, рис. 8.

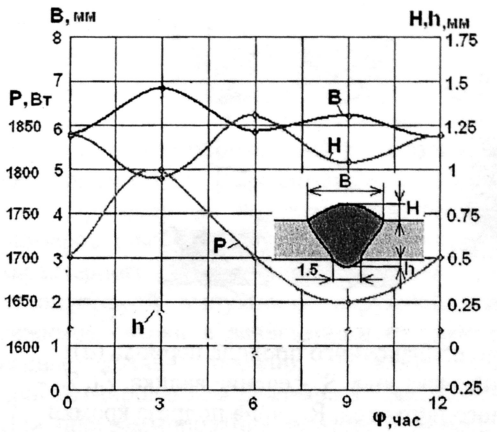

Рис. 8. Изменение мощности импульса тока дуги в зависимости от угла поворота сварочной горелки для обеспечения постоянной ширины (b=1,5мм) проплава корня шва на трубе с толщиной стенки 3 мм из стали Ст 3 (длительность импульса 0,5 с., пауза 0,5 с., скорость сварки 1,5 мм/с. Присадочная проволока Св-08Г2С диаметром 0,8 мм, скорость подачи 15 мм/с)

При сварке корневого прохода влияние пространственного положения уменьшается при сварке импульсной дугой, если режим обеспечивает периодичность плавления и кристаллизации, но обеспечивает непрерывность шва. Различие формирования при начале процесса и его завершении менее существенны, если процесс начать в положении 7…8 ч, рис. 9.

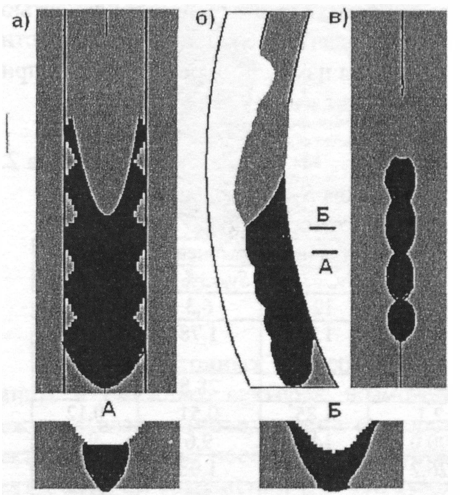

Рис. 9. Форма сварочной ванны и шва при сварке в положениях 11-1 ч и 7-8 ч: а) внешняя поверхность трубы, б) плоскость стыка, в) внутренняя поверхность А, Б – сечения шва в паузе и импульсе тока

Методами компьютерного инженерного анализа определены оптимальные значения сварки заполняющих и облицовочных проходов. Критериями оптимизации являлись обеспечение плавления поверхности кромок и валика от предыдущего прохода, а также получение вогнутой поверхности валика. При слишком большом периоде и недостаточной амплитуде колебаний возникают непровары у кромок разделки, а при линейной форме поперечных колебаний велика неравномерность проплавления, рис. 10.

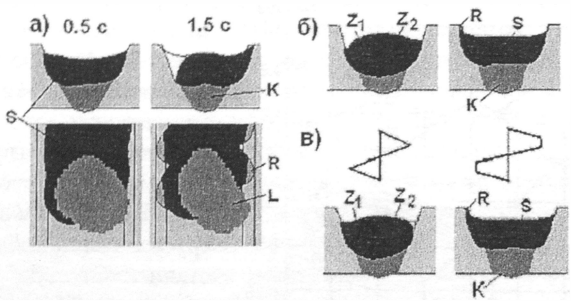

Рис. 10. Влияние на формирование наплавочного прохода периода (*а*), амплитуды (*б*) и формы (*в*) колебаний электрода. S –сечение валика, Z_1, Z_2 – поверхности коневого и наплавочного проходов, R – зона подреза кромки

Оптимально использование поперечных колебаний электрода по трапецеидальной траектории с периодом колебаний, обратно пропорциональным скорости сварки с коэффициентом пропорциональности не более 7…8, и задержками дуги у кромок на 0,25…0,30 с, при размахе колебаний до 0,70…0,75 ширины разделки. При выполнении сварки неизбежны отклонения параметров процесса, поэтому были оценены возможные относительные отклонения размеров шва S_Y,% вызываемые нестабильностью радиуса столба дуги S_R, скорости сварки Sv_w и подачи проволоки Sv_f, мощности дуги S_P . Путём моделирования были определены изменения размеров шва при этих отклонениях, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Относительные отклонения размеров шва S_Y,% вызываемые нестабильностью параметров процесса сварки

Размер сварочной ванны и шва Y	Относительные отклонения S_Y,%			
	S_R=10%	Sv_w=3%	Sv_f=3%	S_P=1%
Ширина проплава корня шва b_b	64,0	12,6	6,3	6,32
Выпуклость наружной поверхности шва h_t	11,2	1,38	1,78	4,4
Выпуклость проплава h_b	96,0	15,0	28,8	10,0
Площадь ванны сверху S_t	2,1	1,85	0,51	0,12
Площадь ванны снизу S_b	90,0	14,4	9,6	9,2
Объём ванны V	26,2	6,74	1,08	2,56
Площадь сечения шва S_h	16,7	4,8	1,2	0,15

Установлено, что размеры шва в наибольшей степени зависят от концентрированности факела дуги, а также к скорости подачи проволоки. Оценка степени влияния нестабильности концентрированности (радиуса) дуги на формирование швов подтверждает правильность выбора для сварочных работ способа сварки неплавящимся электродом, обеспечивающего значительно более стабильные размеры дуги по сравнению с плавящимся электродом. Полученные результаты определяют требования к стабильности параметров источника питания 1%, а механизмов подачи присадочной проволоки и перемещения горелки вдоль стыка - 2%.

Результаты проведенных исследований позволили сформулировать технические требования к процессам сварки и сварочному оборудованию

В главе 5 представлены результаты разработки технологии автоматической орбитальной сварки трубопроводов малых диаметров на КС и необходимого для их реализации сварочного оборудования.

Проведенные исследования показали, что обеспечение стабильных размеров швов при сварке в различных пространственных положениях, без характерного увеличения проплава корня шва или его вогнутости, недопустимой выпуклости наружной поверхности шва без корректировки режимов сварки в зависимости от пространственного положения сварочной ванны крайне сложно. Поэтому сварку необходимо выполнять с программированием режимов в зависимости от положения сварочной горелки. При программировании режима периметр сварного соединения должен быть разбит на ряд секторов по условиям формирования сварочной ванны.

Рекомендуемая схема расположения секторов при программировании режимов автоматической орбитальной сварки приведена на рис. 11.

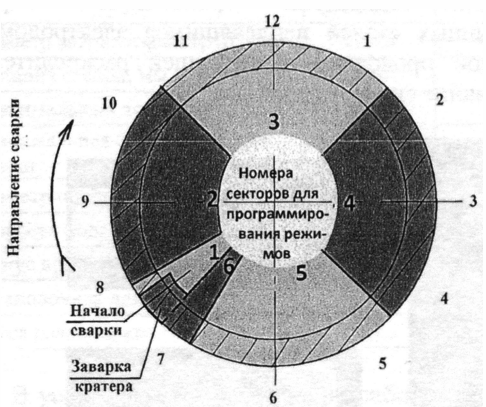

Рис. 11. Схема разбивки периметра сварного соединения на сектора в часовых координатах для программирования процесса сварки

В случае сходных температурных условий для формирования сварочной ванны в смежных секторах возможно установление для них одинаковых режимов сварки (объединение секторов), либо наоборот – увеличение числа секторов в случае необходимости установления переходных режимов между секторами при сохранении угловой суммы секторов не менее 360 градусов.

С учетом изложенных подходов были определены режимы сварки швов трубопроводов диаметром от 12 до 219 мм, с толщиной стенки от 2,0 до 15 мм.

В качестве примера в табл. 3 представлены режимы сварки стыков труб ∅108х6мм из стали 20 в U-образную разделку. Защитный газ - 100 % аргон. Расход газа - 10-12 л/мин. Присадочная проволока Св-08Г2С ∅ 0,9 мм.

Таблица 3.

Режимы сварки трубопроводов диаметром от 79 до 159 мм с толщиной стенки от 3,0 до 8,0 мм с колебаниями электрода в разделке

Параметр	**Значение параметра**									
	корневой				заполняющий			облицовочный		
Режим сварки	шаго-импульсный				непрерывный					
Сектор	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3
Угол, °	20	100		140	15	335	12	10	340	10
Шаг сварки, мм	1,5				-			-		
Скорость сварки, мм/с	-				1,0			0,9		
Скорость подачи проволоки, мм/с	8		9	7	30	40	32	30	27	35
Амплитуда колебаний, мм	-				9,0			9,5		
Скорость колебаний, мм/с	-				32	23	30	20		
Задержки на кромках, с	-				0,15-0,3					
Ток импульса, А	184	196	168	160	-					
Ток паузы, А	10				-					
Ток сварки, А	-				128	133	131	140	135	137
Время импульса, с	0,6	0,5	0,7		-					
Время паузы, с	0,7	0,6	0,8	1,0	-					

Реализация представленной технологии орбитальной сварки низкоуглеродистых низколегированных сталей неплавящимся электродом с обязательной подачей присадочной проволоки, содержащей раскислители, обеспечивает стабильное формирование сварного шва, рис. 12.

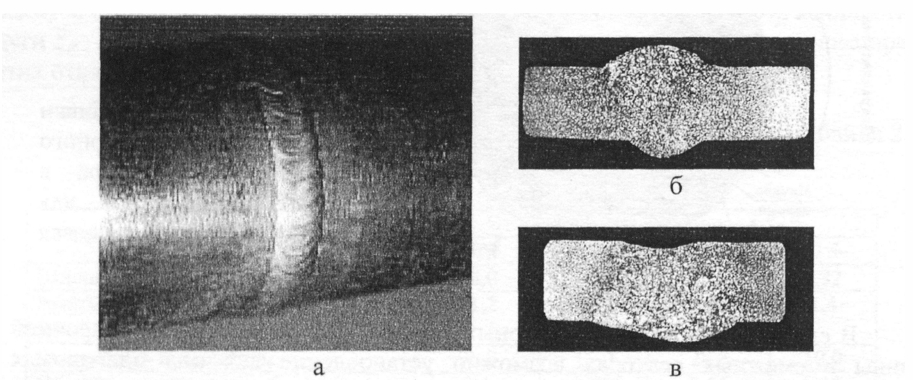

Рис. 12. Формирование шва при орбитальной сварке труб диаметром 57×4 из стали 20 в U-образную разделку: *а* - внешний вид; *б* - макроструктура сварного шва при сварке в нижнем положении; *в* – при сварке в потолочном положении

Обоснованные технические требования к точности позиционирования сварочной горелки, скоростям сварки и подачи присадки были учтены НПП «Технотрон» при проектировании комплекса сварочных автоматов ОКА, в состав которого входят гамма сварочных головок, инверторный источник, микропроцессорная аппаратура управления с дистанционным пультом.

Общий вид гаммы сварочных головок ОКА представлен на рис. 13, а их технические характеристики в табл. 4.

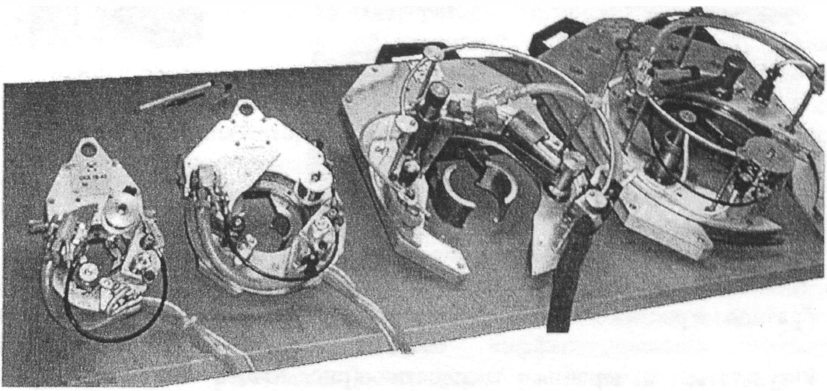

Рис. 13. Гамма сварочных головок ОКА

Таблица 4.

Технические характеристики гаммы сварочных головок ОКА

Параметр	Индекс сварочной головки			
	ОКА 12-45	ОКА 40-80	ОКА 70-140	ОКА 120-220
Диаметр свариваемых труб, мм	12-45	40-80	70-140	120-220
Толщина стенок, мм	до 6	до 8	до 20	до 28
Максимальный ток сварки, А	120	160	200	200
Максимальная скорость сварки, об/мин	6,2	6,7	6,9	7,6
Диаметр проволоки, мм	0,8 - 1,2			
Скорость подачи проволоки, м/ч	8 - 72			
Радиус вращающихся частей, мм	80	100	160	200
Установочная длина, мм	≥ 130	≥ 140	≥ 210	≥ 220
Масса головки, кг	6,7	8	18	26

В установленном порядке разработанные технологии и оборудование для автоматической орбитальной сварки прошли квалификационные испытания на однотипных контрольных сварных соединениях (КСС). После сварки КСС были подвергнуты визуальному, измерительному и радиографическому контролю. Затем, из КСС изготовлены образцы для проведения механических испытаний на статическое растяжение, статический изгиб, сплющивание, ударный изгиб, измерение твердости, анализ макроструктуры. Образцы прошли механические

испытания, в результате проведения которых установлены высокие значения ударной вязкости и пластичности всех КСС, что особенно важно, когда трубопроводы работают при циклических нагрузках.

Результаты механических испытаний соединений показаны на рис. 14.

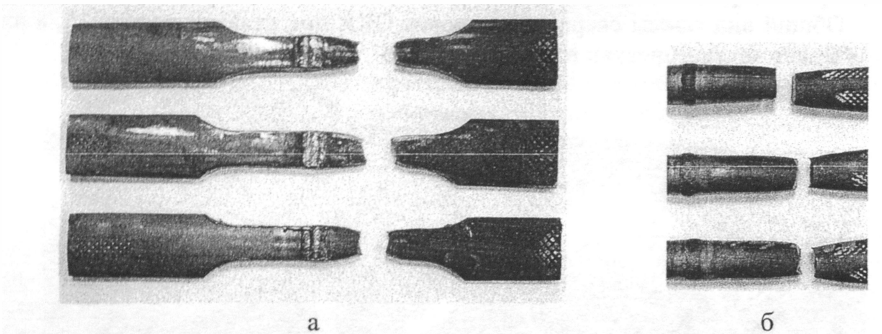

Рис. 14. Результаты испытаний сварных соединений плоских (а) и трубчатых (б) образцов на растяжение: разрушение по основному металлу вне зоны шва

Результаты измерения твердости (рис. 15), анализ макро- и микроструктуры образцов КСС показали их соответствие требованиям ГОСТ 6996-66 и нормативно-технической документации ОАО «Газпром».

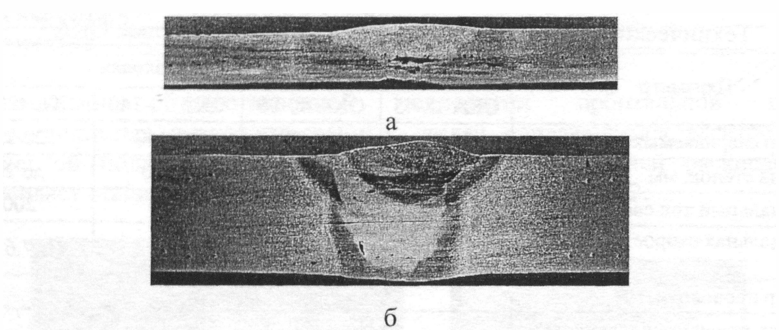

Рис. 5.13. Образцы сварных соединений из трубы Ø108×6,0 мм (*а*) и Ø219×14,0 мм (*б*) для измерения твердости, анализа макро- и микроструктуры

Таким образом, представленное оборудование для автоматической орбитальной сварки трубопроводов прошло необходимые квалификационные испытания и вошло в реестр оборудования, рекомендованного для применения на объектах ОАО «Газпром». В настоящее время орбитальные автоматы ОКА успешно применяется на строительстве линейных и головных КС, входящих в состав Северо-Европейского газопровода, МГ «Бованенково - Ухта», реконструкции дожимных КС Ямбургского и Заполярного месторождений газа. Используются они и при расширении мощностей целого ряда подземных хранилищ газа (ПХГ), со значительным экономическим эффектом.

Общие выводы и результаты

1. При ремонте трубопроводов из компрессорных станций магистральных газопроводов из-за высокой плотности трубопроводов применяют ручную дуговую сварку, так как автоматы для сварки плавящимся электродом имеют ограниченные возможности регулирования, а сварка неплавящимся электродом низкоуглеродистых низколегированных сталей нестабильна и сопровождается высоким разбрызгиванием.

2. Установлено, что главной причиной нестабильного формирования швов и «кипения» металла при орбитальной сварке труб из конструкционных сталей является недостаточная раскисленность основного металла, уменьшить негативные последствия которой можно подачей, как при сварке корня шва, так и заполнения разделки, присадочной проволоки с раскисляющими элементами в объеме 30% от расплава сварочной ванны.

3. Для проведения инженерного анализа условий формирования швов при импульсной орбитальной сварке с поперечными колебаниями электрода разработана нестационарная физико-математическая модель формирования шва при орбитальной сварке вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки, основанная на системе дифференциальных уравнений теплопроводности и равновесия поверхности расплава, граничные условия которых учитывают форму стыка после выполнения предыдущего прохода.

4. Установлено, что стабильные размеры корня шва обеспечивает шаго-импульсная сварка, амплитуда и длительность импульса тока которой, синхронизированные с шагом перемещения горелки создают условия периодического плавления и полной кристаллизацией металла шва, предотвращающие стекание расплава при изменении пространственного положения сварочной ванны.

5. Показано, что использование при сварке наплавочных и облицовочных проходов поперечных колебаний неплавящегося электрода трапецеидальной формы с периодом колебаний, обратно пропорциональным скорости сварки с коэффициентом пропорциональности не более 7…8, и задержками дуги у кромок на 0,25…0,30 с, при размахе колебаний до 0,70…0,75 ширины разделки обеспечивают отсутствие непроваров у ее кромок.

6. Показано, что изменение геометрических размеров сварных швов из-за изменения пространственного положения сварочной ванны устраняется программированием тепловложения по синусоидальному закону, с увеличением его на 9…11% от номинального значения в положении 2,5…3,0 ч и уменьшением на 5…6% в положении 8,5…9,0 ч, при условии начала процесса сварки в положении 7-8 ч по циферблату часов.

7. Результаты работы использованы при разработке технологий и оборудования для сварки при строительстве и ремонте компрессорных станций.

8. Осуществлено промышленное внедрение автоматов ОКА на объектах ОАО «Газпром», которое показало, что разработанные технологии и оборудование обеспечивают стабильно высокое качество сварных соединений при сварке трубопроводов малых диаметров и снижают брак до 0,4-0,6%.

Экономический эффект от внедрения разработки составил более 16,4 млн. руб. в год (в ценах 2012 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Новые технологии сварки при строительстве и ремонте газопроводов / А.В. Шипилов [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. - 2006. - № 2. - С. 27 – 34.
2. Шипилов А.В. Особенности автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом трубопроводов обвязки компрессорных станций // Сварка и диагностика. - 2010. - № 5. - С. 42 – 47.
3. Шипилов А.В., Куркин А.С., Полосков С.И. Влияние формы и размеров сварных соединений на долговечность трубопроводов компрессорных станций // Сварка и диагностика. - 2010. - № 6. - С. 47 – 51.
4. Опыт создания отечественного блочно-модульного оборудования для автоматической орбитальной TIG-сварки с подачей присадочной проволоки / А.В. Шипилов [и др.] // Сварка и диагностика.-2011.-№ 1.-С.36–41.
5. Физико-математическая модель орбитальной сварки неплавящимся электродом в инертных газах: концепция и возможности / А.В. Шипилов [и др.] // Сварка и диагностика. - 2011. - № 2. - С. 3 – 9.
6. Компьютерный анализ качественного формирования швов при орбитальной сварке трубопроводов малых диаметров из конструкционных сталей / А.В. Шипилов [и др.] // Сварка и диагностика.- 2011.- № 5.- С. 17 – 23.
7. Шипилов А.В., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Компьютерный анализ технологий многопроходной орбитальной сварки неплавящимся электродом трубопроводов малых диаметров // Сварка и диагностика.-2011.-№ 6.-С. 26 – 31.
8. Управление структурой сварных соединений при орбитальной TIG-сварке технологических трубопроводов компрессорных станций / А.В. Шипилов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение.- 2011. - № 6. - С. 44 – 52.
9. Шипилов А.В., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Определение оптимальных условий плавления присадочной проволоки при автоматической орбитальной сварке стальных трубопроводов // Сварочное производство. - 2012. - № 3. - С. 12 – 19.
10. Шипилов А.В., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Оценка влияния погрешностей сборки на качество сварных соединений при орбитальной сварке трубопроводов малых диаметров // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2012. - № 3. - С. 14 – 19.
11. Шипилов А.В., Вышемирский Е.М., Полосков С.И. Технические требования к технологиям и оборудованию для сварки трубопроводов малых диаметров на компрессорных станциях // Территория Нефтегаз. - 2012. - № 3. - С. 58 – 61.
12. Новые технологии и оборудование для автоматической орбитальной сварки технологических трубопроводов малых диаметров / А.В. Шипилов [и др.] // Газовая промышленность. - 2012. - № 11. - С. 60 – 64.